

ПРОСТОЙ ДЕФЕКТОСКОП ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ КАНАТОВ

БАЛАШОВ И. А.

Доцент, кандидат технических наук

Введение

Физические методы испытания готовых изделий без их разрушения в последние годы получают по праву все большее распространение в промышленности. Особенно большое и эффективное развитие получили электромагнитные методы анализа, как обладающие быстротой исследования изделий, так и благодаря универсальности их применения. Наибольшее распространение физические методы, как средство контроля, получают в цехах массового производства и в заводских лабораториях.

В условиях эксплуатации также имеются элементы оборудования, повседневной контроль состояния коих крайне необходим.

Примером таких элементов могут служить рельсы в железнодорожном транспорте, канаты в рудничных подъемных установках и т. д. Если в транспорте имеются уже давно действующие установки электро и магнитного исследования уложенных рельсовых путей как у нас в союзной, так и в заграничной практике, например, известные дефектоскопы Карцова, СОФТИ, Сузуки и другие то в горной промышленности действующих установок для контроля состояния канатов до сих пор еще нет. Исследования по разработке методов контроля состояния канатов не выходят за пределы лабораторных моделей, а на рудниках оценка пригодности канатов производится путем непосредственного осмотра, подсчета числа порванных наружных проволок и периодических концевых испытаний в лабораториях на разрыв и изгиб проволок, составляющих канат. На основе этих данных выносится суждение о пригодности каната для дальнейшей его работы. Лишь в самое последнее время (в 1941 г.) изготовлен пробный промышленный образец канатного дефектоскопа в Московском горном институте, тип МГИ-2.

Промышленные испытания не представилось возможным произвести вследствие начала войны. Необходимо лишь отметить, что указанный дефектоскоп имеет своим назначением обнаруживать внешние и внутренние порывы проволок каната и отличается большой сложностью своего устройства.

Вышеуказанные обстоятельства подчеркивают острую необходимость интенсивной работы над вопросами правильного критерия для суждения о прочности каната, с одной стороны, и изыскания простых приборов электромагнитной системы для суждения о состоянии каната в данный момент—с другой.

Методы контроля состояния канатов

Существующие методы контроля общего состояния каната сводятся к ежедневному непосредственному осмотру каната. При этом осмотре обращается внимание на то, чтобы не допустить в канате грубых нарушений

во внешнем его виде: образование „жучков“, массового порыва проволок, выпучивания прядей, а также ведется точная регистрация числа порванных проволок, выходящих на внешнюю поверхность каната. Если число видимых порванных проволок на протяжении одного шага свивки каната оказывается свыше 5% от общего числа проволок, составляющих канат, то производится его замена. Кроме того, для суждения о предельной грузоподъемности каната перед его навеской, а также в процессе работы производятся механические испытания проволок каната на разрыв и изгиб в испытательных лабораториях. Для этих испытаний отрубается конец каната длиной в 5 м считая от места его заделки у подъемного сосуда, если канат работающий, или конец в 1,5 м у вновь навешиваемого каната.

Порядок и методика производства концевых испытаний канатов в лабораториях регламентирован „Инструкцией по испытанию рудничных стальных канатов“ Государственной главной горнотехнической инспекцией Наркомугля СССР (Гостоптехиздат, 1941 г.).

Таким образом, на основании систематического наблюдения за внешним состоянием каната и на основании данных лабораторного испытания по отрубленным концам выносится суждение о возможности дальнейшей

работы каната или необходимости его смены, если запас прочности или внешнее состояние не удовлетворяет необходимым требованиям. Насколько эффективен и в какой мере удовлетворяет практическим требованиям этот метод контроля состояния каната будет указано дальше.

В связи с развитием электромагнитных способов контроля готовых изделий ведется также интенсивная работа по применению методов дефектоскопии к проволочным стальным канатам. Основной электромагнитный метод контроля состояния канатов, принятый также и в конструкциях МГИ—1 и МГИ—2, состоит, как это показано на схеме рис. 1, в следующем:

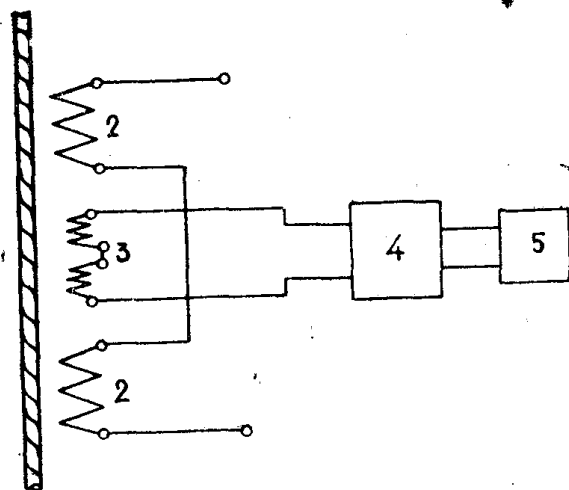


Рис. 1. Принцип действия дефектоскопов.

1—канат; 2—намагничивающие катушки; 3—искательные катушки (щупы); 4—усилитель; 5—регистрирующая часть.

- а) в качестве намагничивающего тока применяется постоянный ток;
- б) магнитная цепь, в которую входит также испытуемый канат, доводится до состояния насыщения;
- в) искательные катушки реагируют на поля рассеяния, возникающие при наличии в канате внешних или внутренних порывов проволок;
- г) электродвижущая сила, возбуждаемая полями рассеяния в искательных катушках, усиливается до величины, необходимой для отклонения чувствительного гальванометра или записи на фотобумаге (МГИ—1) или регистрации на ленте (МГИ—2).

На аналогичном по идее принципе построен дефектоскоп СОФТИ для рельс с тем различием, что в качестве намагничивающего тока применен переменный ток с частотой в 500 герц для местного намагничивания, а в качестве индикатора использован телефон или миллиамперметр. Имеются заграничные конструкции, работающие также на переменном токе другой частоты.

Из идеи построения вышеуказанных дефектоскопов следует, что основная задача, которая ставится при их конструировании, состоит в том, чтобы контролировать состояние внешней поверхности детали, а также обнаруживать внутренние пороки, насколько позволяет физическое состояние изделия и способ намагничивания: например, обнаружение трещин продольных и поперечных в головке и подступичной части рельса, расслоения металла в рельсе и т. д.; в канатах—обрывы внешних и частично внутренних проволок, причем число и место порывов регистрируется на ленте.

Имея такую дефектограмму каната, можно получить полное представление о числе порванных проволок на данном участке рабочей части каната. Если в отношении рельс внешние пороки являются важным фактором для суждения о пригодности их дальнейшей эксплуатации, этого нельзя сказать в отношении канатов, свитых из проволок. Порыв отдельной проволоки, как будет указано дальше, дает незначительное снижение агрегатного разрывного усилия всего каната. Происходит это потому, что проволоки в канате, будучи свиты помощью двойной свивки на канатомотательных машинах, составляют сложное тело и каждая проволока оказывается защемленной в пряди и канате, а при ее разрыве подвергается трению настолько, что на некотором расстоянии от места порыва участвует в работе каната как цельная проволока. Это обстоятельство ставит вопрос о прочности каната более широко, чем прочность сплошного изделия, например, сплошного стержня или рельса.

Прочность канатов

Прочность каната регламентирована правилами безопасности в каменнотугольной промышленности следующим образом: „ § 115. Запас прочности каната при повторных испытаниях определяется как отношение суммарного разрывного усилия всех проволок каната за вычетом проволок не выдержавших испытания на разрыв или изгиб, к максимальной нагрузке на канат с учетом веса самого каната“. Если запас прочности становится равным или меньшим допустимого, канат подлежит замене.

Недостаточность критерия оценки прочности каната по конечным испытаниям согласно § 115 правил безопасности можно проиллюстрировать таким примером.

22. II—1932 г. на клетьевом подъеме № 1 шахты „София Вертикальная“ (Донбасс) произошел обрыв правого каната диаметром 40 мм при подъеме нормального груза в начале подъема. Канат был в работе около года. Согласно конечных испытаний каната, произведенных за 4½ месяца до аварии, разрешенная нагрузка составляла 16120 кг, при фактической его нагрузке 11640 кг, канат имел вполне допустимый запас прочности 8,4, при минимально допустимом запасе для грузо-людского подъема 7,5 (См. труды МАКНИИ—том II—1935 г. статья В. А. Цветкова).

Указанный факт послужил основанием для постановки обстоятельных опытов в МАКНИИ по выяснению зависимости между агрегатной прочностью (крепостью) каната и прочностью, определяемой как условная прочность, по сумме разрывных усилий проволок, выдержавших испытание на разрыв и изгиб при испытаниях в лабораториях по испытанию канатов. Установлено, что агрегатная прочность каната после его навески возрастает за счет уплотнения проволок, обжима сердечника и перераспределения нагрузки более равномерно между отдельными проволоками, составляющими канат. Общий характер зависимости агрегатной крепости каната от длительности его работы показан на рис. 2.

Установлено, что крепость каната после навески возрастает, и спустя лишь некоторое время, зависящее от условий эксплуатации, начинает

убывать. Основными факторами, влияющими на понижение крепости каната, являются износ внешних проволок, „усталость“ металла и изменение технологических качеств металла. При этом важным является то обстоятельство, что число порванных проволок не является основной характеристикой, влияющей на понижение прочности каната в целом (агрегатной крепости).

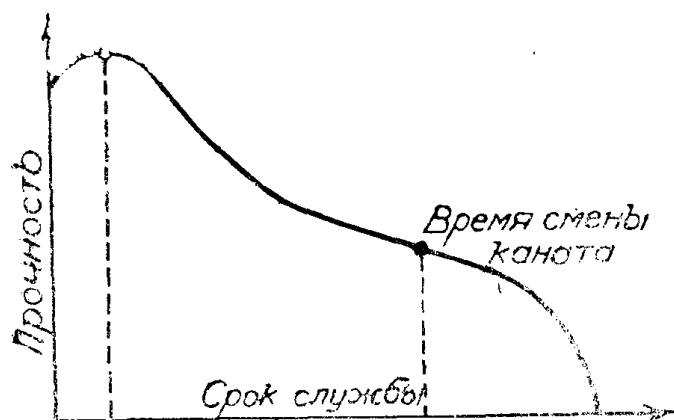


Рис. 2

Так, например, 10% числа оборванных проволок на 1 метре каната уменьшают его агрегатную прочность всего на 0,5—2,5% от его разрывного усилия при ненарушенных проволоках.

Мало того, как показывают исследования проф. Вернле даже при 100% числе порывов проволок, канат сохраняет достаточную прочность, достигающую в некоторых случаях до 50% первоначальной прочности.

Причина такого поведения порванной проволоки в канате объясняется тем, что проволока, будучи свита в прядь, а последняя в шестипрядный канат, т. е. участвуя в двойной свивке при изготовлении каната, оказывается изогнутой по спирали и защемленной. При обрыве в данном сечении, проволока на некотором расстоянии от этого сечения каната, вследствие трения, участвует в агрегатном сопротивлении разрыву каната полным своим сечением.

„Браковка каната по числу оборванных поверхностных проволок возможна только в том случае, если будет установлена зависимость между общей действительной потерей крепости канатом и числом оборванных поверхностных проволок“ (см. там же, стр. 38). Зависимость такого рода не установлена. В соответствии с этим предлагается производить учет числа порывов на „опасной длине каната“. Новая редакция правил безопасности предписывает вести учет числа порывов на одном шаге свивки каната. Однако, Гербст считает бесцельным искать „опасный отрезок каната“, так как при этом не может быть учтен закон распределения порванных проволок. „Необходимо перейти на новые методы контроля и браковки каната, отражающие степень износа и характеризующие крепость по всей длине каната“ (там же, стр. 37).

В результате обработки материалов большой серии испытаний канатов в МАКНИИ, В. А. Цветковым предложен простой способ определения прочности каната путем замера диаметра каната и степени износа поверхностных проволок. Этот простой и доступный способ в настоящее время получил распространение на практике. В этом случае дело сводится к определению действующего в данный момент живого сечения каната, действительно характеризующего уменьшение его рабочего сечения. Единственным недостатком такого метода следует считать лишь то, что внутренние порывы и утонение внутренних проволок вследствие износа и коррозии при этом учтены быть не могут и таковые при замере диаметра участвуют как полезное сечение.

Износ каната вертикальной подъемной установки по длине его рабочей части происходит неравномерно и степень износа отдельных участков зависит главным образом от условий эксплуатации и монтажа машины. Все же, несмотря на различие этих условий, можно установить опре-

деленную закономерность интенсивности износа на рабочей длине каната. Общий характер износа показан на рис. 3.

Участок каната, приходящийся на свес и струну, при верхнем положении подъемного сосуда, изнашивается незначительно. Наибольшему износу подвергаются первые 3—4 витка, когда канат намотан полностью на барабан. Значительное влияние на большой износ именно этой части каната оказывает угол девиации, наличие канавок (ручьев) на барабане, количество и качество смазки каната и т. д. Степень износа остальной части каната снижается и по мере подхода к фрикционным и запасным виткам уменьшается до нуля.

В свете указанной характеристики износа каната существенно отметить, что отрубание каната на испытательную станцию производится в части наиболее благополучной с точки зрения износа и наименее нагруженной с точки зрения фактических напряжений при работе каната, так как опасным сечением считается сечение каната у направляющего шкива, когда сосуд нагружен и находится внизу.

Важность знания величины износа каната приобретает особое значение в связи с тем фактом, что между агрегатной крепостью каната и величиной его износа существует прямая пропорциональность, как это показано на рис. 4.

Кривые крепости канатов и кривые износа их проволок изменяются в одинаковой пропорциональности по их длине, т. е. процентному уменьшению прочности каната соответствует такой же процент износа поверхностных проволок по их диаметру, расположенных радиально к оси каната. Этот важный вывод, полученный в МАКНИИ в результате большой серии опытов по испытанию работавших канатов, послужил основанием для критерия оценки прочности каната по замерам величины износа поверхностных проволок и диаметра каната, о чем было указано выше.

Представляется целесообразным, в развитие метода непосредственных замеров, найти более совершенный метод, позволяющий судить о величине износа каната не в отдельных сечениях, а сплошь по всей длине его рабочей части. Причем существенно важно иметь представление об общем изменении живого сечения каната, независимо от причин, вызвавших это уменьшение сечения. Для выполнения такой задачи может быть использован дифференцированный метод электромагнитной дефектоскопии, как наиболее простой и вполне отвечающий данной цели.

Сравнительный метод определения сечения каната

В условиях эксплуатации каната крайне необходимо иметь картину изменения живого сечения каната по всей длине его рабочей части.

Однако определение абсолютной величины этого сечения электромагнитными методами связано со значительными трудностями теоретического и практического характера. Теоретические затруднения возникают

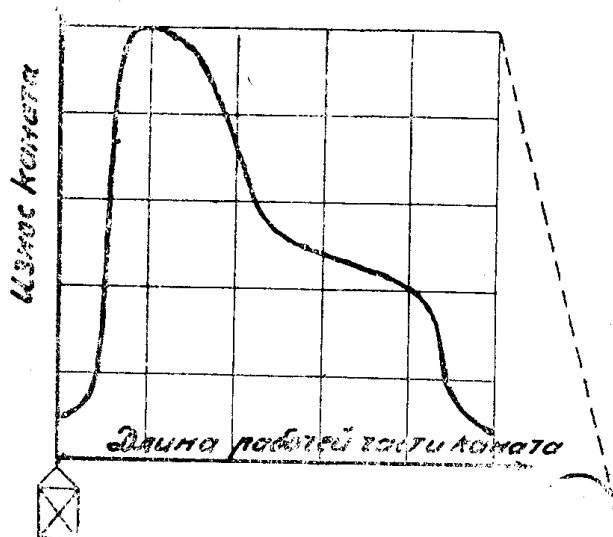


Рис. 3. Общий характер износа каната.

вследствие недостаточной изученности магнитных характеристик материала каната; практические—связаны со сложностью изготовления приборов и отсутствием уверенности в эффективности их действия. Работа в этом

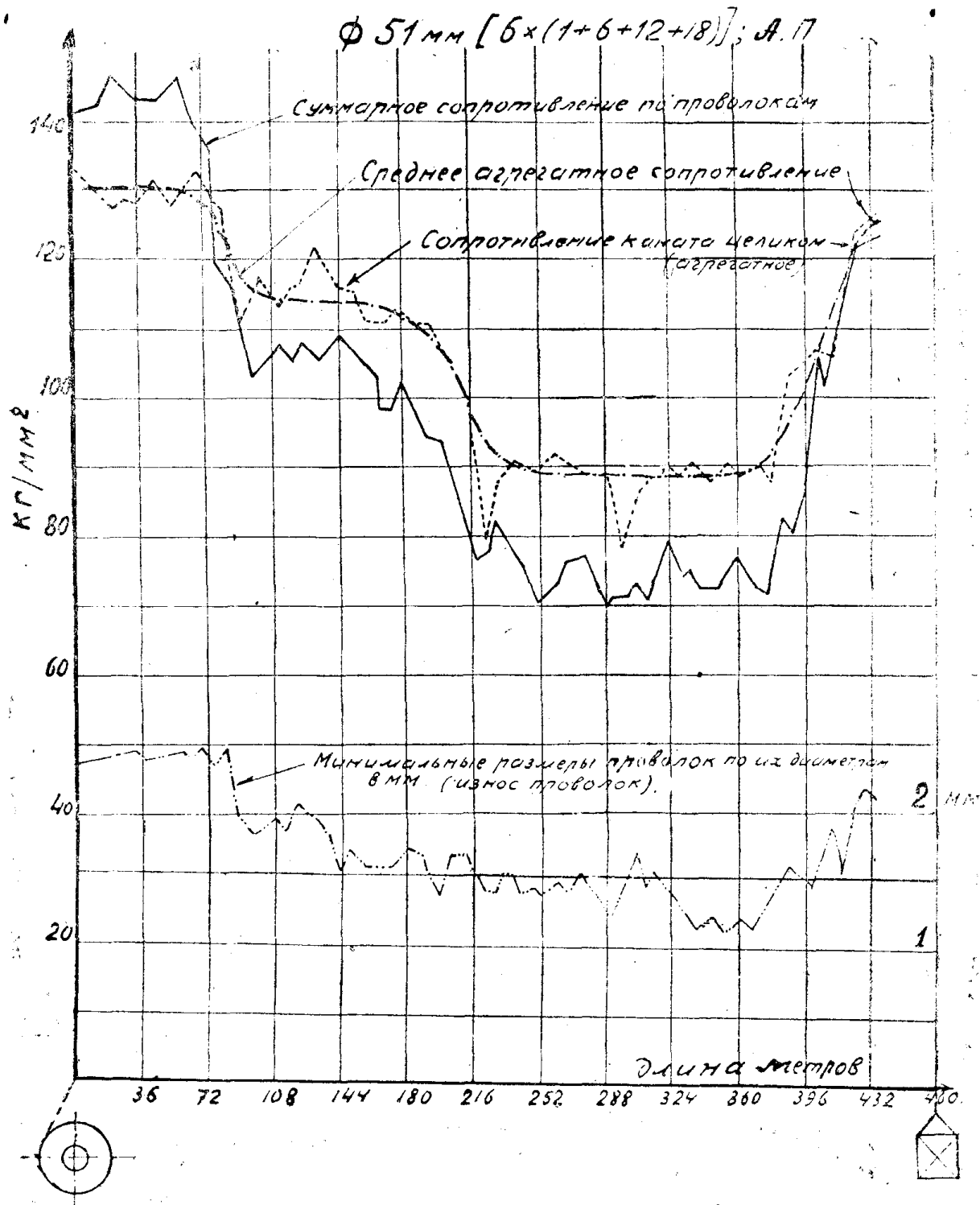


Рис. 4. Агрегатная прочность и износ каната по его длине.

направлении ведется и должна вестись, но в настоящее время необходимо искать способы, дающие более быстрые результаты, удовлетворяющие практическим целям.

Одним из таких способов следует считать сравнительный метод, дающий относительную величину сечения работающего каната к его первоначальному значению, имевшему место при его навеске.

Для этой цели необходимо иметь эталон-канат, отрубленный от навешиваемого каната, и в процессе работы последнего производить сравнение изменяющегося от износа и порывов сечения с первоначальным. Если такие наблюдения производить систематически, можно в каждый данный момент времени дать оценку степени уменьшения сечения каната по всей длине его рабочей части.

Результаты сравнения сечения эталон-каната и каната работающего могут регистрироваться на ленте дефектограммы, что даст наглядный и объективный способ оценки степени износа. При этом регистрирующая часть значительно удорожает и усложняет прибор. Значительное упрощение прибора получается, если наблюдение за отклонением стрелки производить визуально и результаты наблюдений в наиболее изношенной части каната заносить в канатный журнал. Практически достаточно производить проверку каната через определенные промежутки времени, фиксируя износ рабочей части каната по наибольшему отклонению стрелки указательного прибора, который может быть отградуирован на допустимый процент износа каната.

На этом принципе построена лабораторная экспериментальная модель дефектоскопа с разветвленной магнитной цепью, принципиальная схема которой приведена на рис. 5.

Для разветвленной магнитной цепи в первом приближении имеем:

Магнитный поток в цепи эталон-каната

$$\Phi_1 = \Phi_0 \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \quad (1)$$

и магнитный поток в цепи испытуемого каната

$$\Phi_2 = \Phi_0 \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2} \quad (2)$$

В этих уравнениях приняты обозначения (Л-4):

Φ_0 — общий магнитный поток намагничивающей катушки;
 Z_1 и Z_2 — комплексные магнитные сопротивления цепей разветвления.

При этом $Z_1 = (R'_в + R'_ж) + jx'_ж$ комплексное сопротивление цепи эталон каната остается почти постоянным, в то время как $Z_2 = (R''_в + R''_ж) + jx_ж$ — магнитное сопротивление цепи испытуемого каната возрастает как за счет $R''_в$ — увеличения воздушного зазора в полюсе, вследствие уменьшения диаметра каната, так и за счет увеличения $R''_ж$ и $x''_ж$, как величин прямо пропорциональных длине испытуемого образца между полюсами и обратно пропорциональных сечению каната.

Совокупное увеличение магнитного сопротивления цепи испытуемого каната вызывает перераспределение общего магнитного потока согласно уравнениям (1) и (2).

Если на соответственных участках разветвления магнитной цепи поставить катушки и включить их встречно, как это показано на рис. 6, то

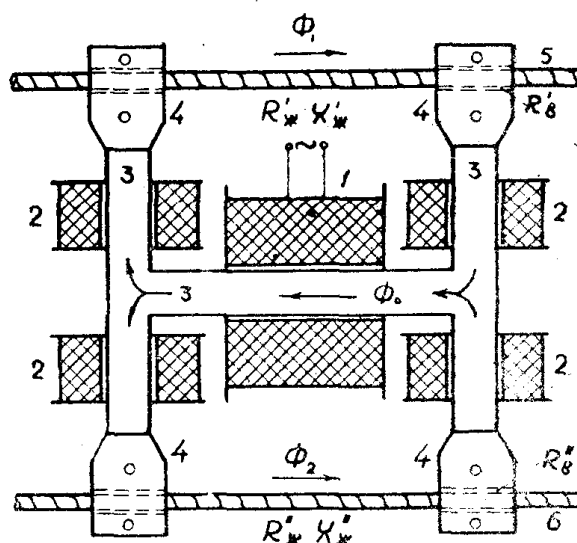


Рис. 5. Магнитная система дефектоскопа.

1 — намагничивающая катушка, 2 — испытательные катушки, 3 — железо, 4 — разъемные полюсы, 5 — эталон-канат, 6 — рабочий канат.

в образованной таким образом электрической цепи будем иметь э.д.с. пропорциональную разности потоков в этих двух магнитных цепях

$$e = k\Phi_p = k(\Phi_1 - \Phi_2). \quad (3)$$

К аналогичному же выводу приходим более наглядно, если считать,

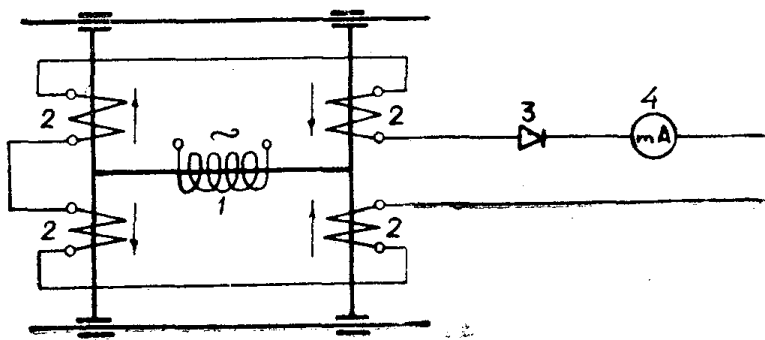


Рис. 6. Электрическая часть дефектоскопа.

1—Намагничивающая катушка, 2—искательные катушки—парно включены встречно, 3—купроксный выпрямитель, 4—миллиамперметр.

что сопротивление в цепи работающего каната будет чисто ваттного характера.

Обозначая через R_1 и R_2 магнитные сопротивления цепи, будем иметь

$$\Phi_1 = \Phi_0 \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \Phi_0 \frac{k R_1}{R_1 + k R_1} = \Phi_0 \frac{k}{1 + k},$$

и

$$\Phi_2 = \Phi_0 \frac{R_1}{R_1 + R_2} = \Phi_0 \frac{R_1}{R_1 + k R_1} = \Phi_0 \frac{1}{1 + k},$$

где принято, что $R_2 = k R_1$

При возрастании коэффициента k функции Φ_1 и Φ_2 стремятся к значениям: первая к Φ_0 и вторая к 0, как это показано на рисунке 7.

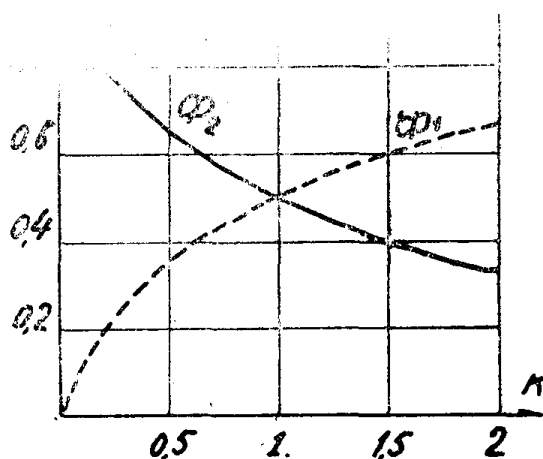


Рис. 7. Изменение магнитного потока в цепях,

Разность потоков в этих магнитных цепях обуславливает возникновение э.д.с. в дифференциально включенных обмотках катушек электрической цепи.

Лабораторная модель

На основании теоретических положений, сформулированных в предыдущем параграфе, изготовлена лабораторная модель, магнитная система которой показана на рис. 8.

Как видно из проекций *а* и *б* этого рисунка, магнитная система состоит из двух симметричных магнитных цепей с размерами железа, указанными на рисунке.

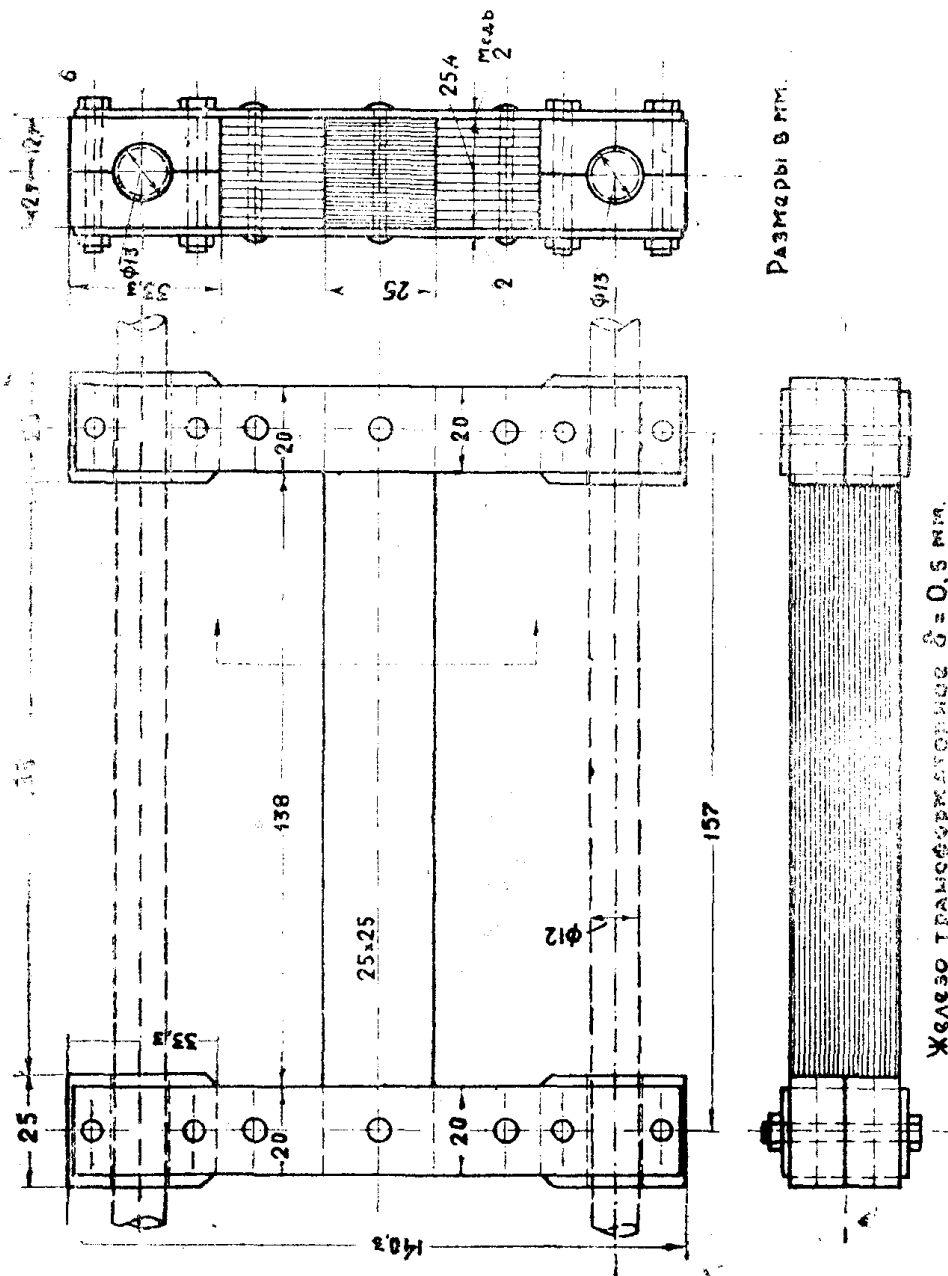


Рис. 8. Магнитная цепь дефектоскопа

занными на рисунке. Для закладки канатов в электромагнит полюсы сделаны разъемными с отверстиями для канатов по 13 мм. Экспериментирование производилось с канатом конструкции $6 \times 19 + 1$ диаметром 12 мм, толщина проволок каната 0,75 мм.

Электрическая схема модели выполнена в двух вариантах, показанных на рис. 9-а и 9-б.

Разница между этими схемами состоит в том, что в первой в качестве индикатора использован щитовой вольтметр постоянного тока, с за-

шунтированным сопротивлением, а во втором — дифференциально включенные искательные катушки питают промежуточный трансформатор, во вто-

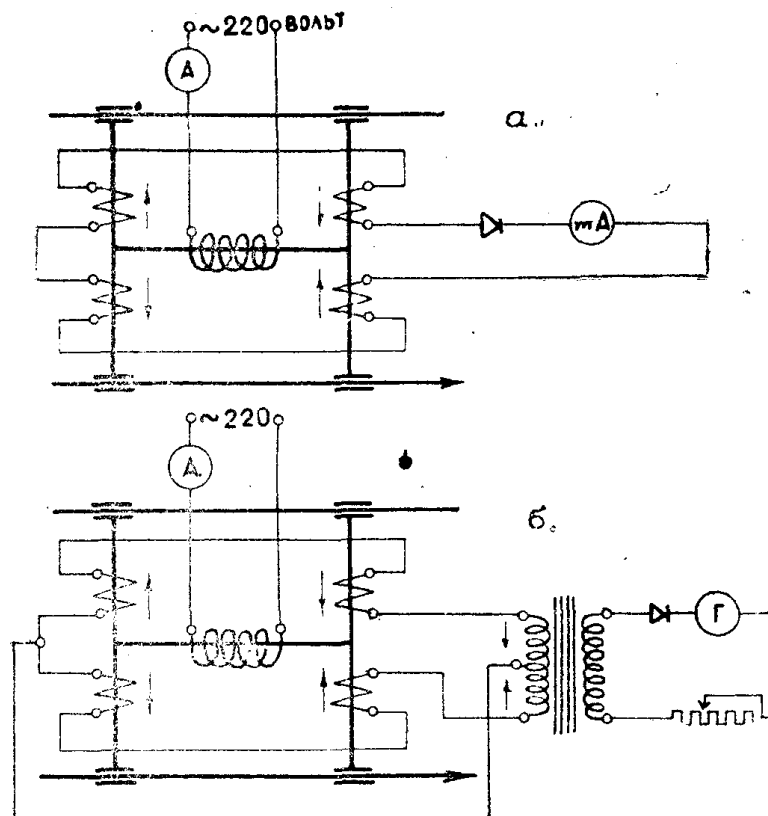


Рис. 9. Электрические схемы искательных катушек.

а) с электромагнитным вольтметром, б) с гальванометром.

ричную обмотку которого включен гальванометр с чувствительностью $I_0 = 0,43 \times 10^{-6} \text{ а}$, тип С—3, со шкалой на 100 делений.

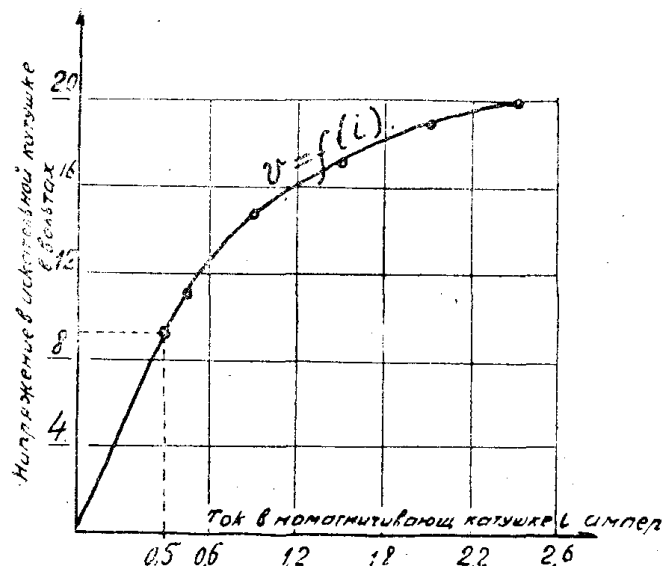


Рис. 10. Магнитная характеристика железа.

В обеих схемах для выпрямления переменного тока в постоянный включен купроксный выпрямитель, пропускающий одну полуволну переменного

го тока. Величина тока намагничивающей катушки 0,5 амп. при 220 в выбрана на основании магнитной характеристики, показанной на рис. 10, т. е. на прямолинейной ее части.

Опытная часть

Экспериментирование производилось по двум схемам, приведенным выше на рис. 9-а и 9б.

Степень износа работающего каната имитировалась удалением проволок из каната или искусственными повреждениями его внешних проволок.

Для этой цели было изготовлено 7 образцов. Характеристика искусственных повреждений на испытуемых образцах указана в таблице 1.

Таблица 1

№ образца	Наименование образца каната	Характеристика	Площадь поперечного сечения в %	Процент уменьшения сечения по сравнению с эталоном
0	Эталон — канат	Крестовой свивки $6 \times 19 + 1 - 114$ пров.	100	0
1	Испытуемый	Тоже $6 \times 19 + 1 - 114$ пров.	100	0
2	"	Вынуто 6 проволок по одной из пряди	95	5
3	"	Тоже 12 проволок по 2 из пряди	89.5	10.5
4	"	Снята одна прядь в 19 проволок	82.5	17.5
5	"	Вынуто 24 проволоки, по 4 из пряди	79	21
6	"	На внешних проволоках сделаны надрезы на $\frac{1}{2}$ диаметра	—	—
7	"	Тоже, опилены наружные проволоки на $\frac{1}{2}$ диаметра по всей длине	—	—

Подбирая параметры магнитной и электрической цепей, а также индикатора, представилось возможным шкалу электромагнитного вольтметра, использованного в качестве индикатора, отградуировать на процент износа рабочего каната по отношению к эталон-канату.

При этом уменьшению сечения испытуемого каната на 20% от его первоначальной величины соответствовало отклонение стрелки прибора на $\frac{3}{4}$ полной его шкалы, с делениями на этой части 0—100%.

В таком случае по шкале прибора непосредственно отсчитывается процент износа рабочего каната. Отклонение стрелки прибора на 100% будет обозначать предельно допустимый износ и сигнализировать о наступлении времени замены каната новым.

Результаты первой серии опытов с канатами, указанными в табл. 1, приведены на рис. 11, где по оси ординат указаны деления шкалы индикатора, а по оси абсцисс номера образцов от 0 до 5, в по-

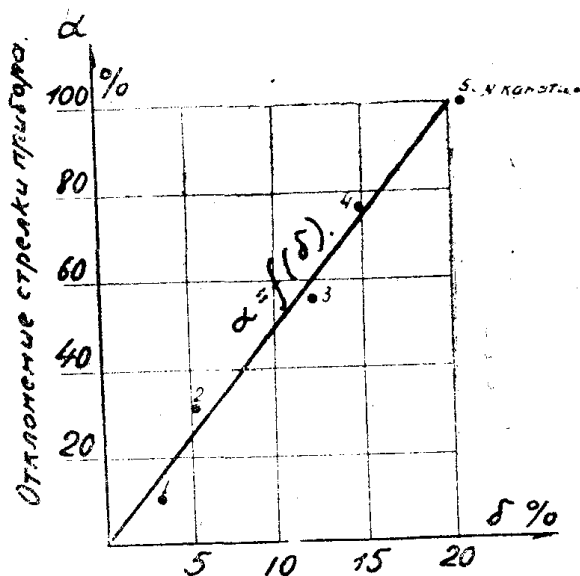


Рис. 11. Отклонение стрелки прибора в зависимости от степени износа каната, (уменьшения его сечения).

рядке уменьшения сечения или, согласно принятой методики, в порядке увеличения износа каната. Канат № 5 имеет предельный износ и при его постановке в модель индикатор давал наибольшее отклонение.

Экспериментальные точки дают разброс от прямой линии в обе стороны около $\pm 5\%$, но закон прямой пропорциональности явно обнаруживается.

Выводы

На основании экспериментов, произведенных с лабораторной моделью, представляется возможным сделать некоторые предварительные выводы:

1. Сравнение живого сечения работающего каната с эталон-канатом, взятым из того же каната до навески, дает достаточный критерий использования его агрегатной прочности.

2. Сравнение сечений возможно производить дифференциальным методом, указанным в работе.

3. В качестве индикатора состояния степени износа каната может быть использован щитовой прибор, отградуированный на проценты износа каната.

4. Подбором параметров магнитной и электрической цепей, а также чувствительности измерительного прибора можно получить шкалу, вполне достаточную для визуального отсчета, что значительно упрощает прибор.

5. Модель аппарата проста по конструкции и состоит из стандартных приборов, что дает основание полагать, что окончательные результаты работы дадут материал, достаточный, чтобы сформулировать технические условия для проектирования промышленного образца.